

# INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS NA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES NÃO LINEARES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

**Edival Carvalho da Silva** (UFCG) - edival.silva@ee.ufcg.edu.br

**Eubis Pereira Machado** (UNIVASF) - eubis.machado@univasf.edu.br

**Damásio Fernandes Júnior** (UFCG) - damasio@dee.ufcg.edu.br

**Adeon Cecilio Pinto** (UNIVASF) - adeonpinto@bol.com.br

## **Resumo:**

*O estudo de módulos fotovoltaicos requer a aplicação de metodologias iterativas para solucionar o equacionamento não linear do sistema. Sabe-se que os métodos computacionais iterativos demandam um grande esforço de processamento para realização dos cálculos em virtude das diversas operações realizadas. Entretanto, em certas aplicações, alguns métodos sobressaem em relação a outros, seja na aproximação final ou no tempo de execução. Com esse trabalho, objetivou-se investigar o desempenho de métodos computacionais aplicados na solução de equações não lineares para obtenção da corrente de saída de um painel fotovoltaico, sob diversas condições de irradiância e temperatura. Foram escolhidos o método de Newton-Raphson e algumas variações deste que visam melhorar a convergência. A análise deu-se por meio de quesitos de suma importância quando se trata de métodos iterativos, são eles: o valor final obtido, o número de iterações realizadas no processo e o tempo de execução. Um ou mais métodos destacaram-se para cada quesito analisado, além disso, observou-se que um dos métodos não pode ser aplicado a esse problema em virtude da sua não convergência. A partir das análises, pôde-se verificar que o método de Newton-Raphson, mesmo possuindo convergência quadrática, ainda é a melhor opção quando se trata da solução das equações dos modelos representativos dos módulos fotovoltaicos a um diodo.*

**Palavras-chave:** *Energia solar, Curva característica, Métodos numéricos.*

**Área temática:** *Conversão Fotovoltaica*

**Subárea temática:** *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

# INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS NA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES NÃO LINEARES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

**Edival Carvalho da Silva** – edival.silva@ee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática

**Prof. Eubis Pereira Machado** – eubis.machado@univasf.edu.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Elétrica

**Prof. Damásio Fernandes Junior** – damasio@dee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática

**Prof. Adeon Cecílio Pinto** – adeonpinto@bol.com.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Elétrica

**Resumo.** *O estudo de módulos fotovoltaicos requer a aplicação de metodologias iterativas para solucionar o equacionamento não linear do sistema. Sabe-se que os métodos computacionais iterativos demandam um grande esforço de processamento para realização dos cálculos em virtude das diversas operações realizadas. Entretanto, em certas aplicações, alguns métodos sobressaem em relação a outros, seja na aproximação final ou no tempo de execução. Com esse trabalho, objetivou-se investigar o desempenho de métodos computacionais aplicados na solução de equações não lineares para obtenção da corrente de saída de um painel fotovoltaico, sob diversas condições de irradiância e temperatura. Foram escolhidos o método de Newton-Raphson e algumas variações deste que visam melhorar a convergência. A análise deu-se por meio de quesitos de suma importância quando se trata de métodos iterativos, são eles: o valor final obtido, o número de iterações realizadas no processo e o tempo de execução. Um ou mais métodos destacaram-se para cada quesito analisado, além disso, observou-se que um dos métodos não pode ser aplicado a esse problema em virtude da sua não convergência. A partir das análises, pôde-se verificar que o método de Newton-Raphson, mesmo possuindo convergência quadrática, ainda é a melhor opção quando se trata da solução das equações dos modelos representativos dos módulos fotovoltaicos a um diodo.*

**Palavras-chave:** *Energia solar, Curva característica, Métodos numéricos.*

## 1. INTRODUÇÃO

Na Matemática, análise numérica significa resolver problemas matemáticos por meio de operações aritméticas simples, como: adição, subtração, multiplicação, divisão e comparação. Uma vez que estas operações são exatamente aquelas que os computadores podem realizar (ALVAREZ, 2015). O cálculo numérico retorna à solução de problemas de forma aproximada, esses métodos apresentam operações simples de serem implementadas na lógica computacional, desse modo, ficam intimamente relacionados aos computadores, o que indiretamente impulsionou o desenvolvimento destes, tanto em velocidade de processamento, quanto em capacidade de armazenamento (MAMEDE, 2018).

Os fenômenos naturais que são compreensíveis para o homem e pela ciência são geralmente modelados por meio de equações algébricas, diferenciais ou integrais. Por meio da observação, experimentação e formulação de hipóteses as equações são extraídas e um modelo matemático que exprime o comportamento do fenômeno é criado (CHAVES, 2019). Na engenharia a solução desses modelos, que na grande maioria são impossíveis de resolver analiticamente, emprega-se os métodos numéricos que são capazes de resolver um grande número de equações lineares ou não. Como a principal função desses métodos é reduzir a matemática mais avançada a operações aritméticas básicas, eles propiciam chegar a detalhes práticos de tópicos que, de outra forma, seriam obscuros (CHAPRA, 2012).

Um modelo matemático amplamente discutido e em constante aprimoramento é o modelo para determinar a corrente de saída de módulos fotovoltaicos, em função dos seus parâmetros intrínsecos, fatores ambientais e carga terminal. Os módulos contêm, em sua estrutura, elementos semicondutores que propiciam modelos caracterizados por equações transcendentais, ou seja, não lineares. Conhecidas as condições de contorno que caracterizam o ponto de operação do módulo, a tensão terminal e a corrente de saída podem ser obtidas através de métodos numéricos.

Neste trabalho será investigado a aplicação do método de Newton, bem como suas variações propostas na literatura, na solução das equações não lineares de dois modelos de módulos fotovoltaicos: modelo com representação de perdas e modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura. Os métodos são investigados quanto ao procedimento numérico e a eficiência para solucionar as equações em diferentes condições de irradiância e temperatura. Além deste tópico introdutório, este trabalho está dividido em seções, nas quais a seção 2 discute acerca da problemática em estudo, a seção 3 apresenta a teoria a respeito dos métodos iterativos, já a seção 4 apresenta as análises e resultados e por último, a seção 5 resume as principais conclusões desse estudo.

## 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O interesse e o uso da energia solar para produção de eletricidade estão cada vez mais crescentes. Essa Tendência tem sido impulsionada pela importância da sustentabilidade (SAID *et al.*, 2018). Os estudos dos componentes que englobam esse tipo de geração de energia elétrica tornaram-se extremamente necessários. Como está amplamente difundido na literatura, o módulo fotovoltaico é o componente fundamental deste sistema, pois é nele que ocorre a conversão de energia (PINHO & GALDINHO, 2014). Diante disso, existem diversos modelos que simulam o comportamento desses elementos. Neste trabalho, serão utilizados os modelos com representação de perdas na estrutura e o modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura. Ambos os modelos resultam em equações transcendentais, ou seja, não lineares, de modo que seja indispensável o uso de metodologias iterativas para a solução destas.

O bloco básico de construção de um módulo fotovoltaico consiste em um número de células fotovoltaicas conectadas em série, todas encapsuladas em um pacote resistente às intempéries. A seguir serão discutidos os modelos de representação desse componente.

### 3.1 Modelo com representação de perdas

Para o modelo com representação de perdas, caracterizado pela inserção da resistência em série, aplicado ao módulo fotovoltaico, o circuito elétrico equivalente pode ser observado na Fig. 1.

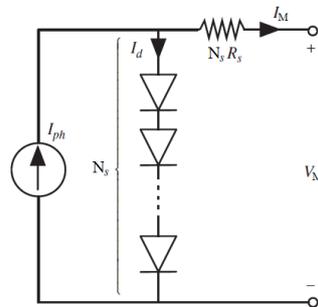


Figura 1 – Circuito equivalente da associação em série de células fotovoltaicas – modelo com representação de perdas.

Pela análise do circuito equivalente do módulo fotovoltaico, a corrente de saída é expressa pela Eq. (1).

$$I_M = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_M + I_M N_s R_s}{N_s n V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Em que:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

Sendo:

- $I_M$  – corrente de saída do módulo;
- $I_{ph}$  – corrente fotogerada;
- $I_o$  – corrente de saturação reversa do diodo;
- $n$  – fator de idealidade;
- $V_T$  – tensão termicamente gerada;
- $V_M$  – tensão nos terminais de saída do módulo;
- $N_s$  – número de células em série;
- $R_s$  – resistência série;
- $k$  – constante de Boltzmann;
- $T$  – temperatura da junção;
- $q$  – carga do elétron.

Deve-se atentar para o fato da existência de parâmetros desconhecidos no equacionamento do modelo, a saber:  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $R_s$  e  $n$ , esses parâmetros são obtidos por processos de estimação paramétrica. Neste trabalho é empregada a metodologia proposta por Walker (2001), por ser um método analítico, simples e eficiente.

### 3.2 Modelo com representação de perdas e defeitos na estrutura

A Fig. 2 apresenta o circuito equivalente para um módulo fotovoltaico com emprego do modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura. Nota-se que no modelo em questão existe a presença de um novo componente, isto é, uma resistência em paralelo com o diodo ( $R_p$ ).

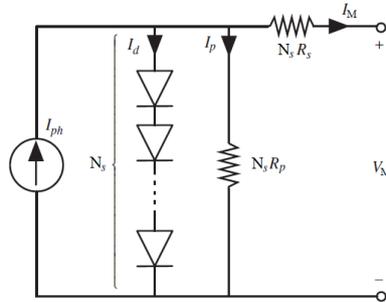


Figura 2 – Circuito equivalente da associação em série de células fotovoltaicas – modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura.

A partir da análise do circuito equivalente, pode-se obter a Eq. (3), que expressa a corrente de saída do módulo fotovoltaico.

$$I_M = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_M + I_M N_s R_s}{N_s n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M N_s R_s}{N_s R_p} \quad (3)$$

Como no modelo anterior, esse também apresenta parâmetros desconhecidos, a saber:  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$ . Tais variáveis desconhecidas são obtidas pelo processo de estimação paramétrica proposto por Villalva *et al.* (2009), por ser uma metodologia muito eficiente.

Ambos os modelos supracitados possuem equações em que a relação entre a tensão e a corrente possui um comportamento não linear. Diante disso, existe a necessidade de se recorrer aos métodos iterativos para solucionar esse equacionamento. Portanto, esse trabalho visa realizar uma análise entre os métodos de Newton-Raphson e variações que apresentam uma alta convergência a fim de se identificar o mais indicado para a solução da equação dos modelos a um diodo para módulos fotovoltaicos.

## 3. METODOLOGIA PARA SOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DOS MODELOS

### 2.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson, aqui denominado pela abreviação NR, corresponde ao método padrão para resolver sistemas de equações não lineares. Ele baseia-se nas estimativas passadas e na derivada da função em estudo, ou seja, além dos valores passados, ele também faz uso da inclinação da curva para estimar os valores futuros.

Seja  $f(x)$  uma função continuamente diferenciável para a variável real  $x$ . Presumindo que  $f(x) = 0$  seja de difícil solução, uma alternativa é encontrar a solução de uma forma aproximada de  $f(x)$ . A série de Taylor fornece meios de aproximar  $f(x)$  por outro modelo mais simples,  $g(x)$ , em torno de um ponto  $x^{(0)}$ :

$$g(x) \approx f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) + \frac{1}{2!} f''(x^{(0)})(x - x^{(0)})^2 + \dots + \frac{1}{n!} f^{(n)}(x^{(0)})(x - x^{(0)})^n \quad (4)$$

Tomando-se uma aproximação de primeira ordem para o modelo:

$$g(x) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) \quad (5)$$

A solução da função  $g(x)$  é direta e é dada por:

$$x = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \quad (6)$$

Contudo, como  $g(x)$  é apenas uma aproximação linear do modelo  $f(x)$ , possivelmente  $f(x) \neq 0$ . Assim, convém escrever a Eq. (6) na forma:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \quad (7)$$

Sendo,  $x^{(k)}$  o valor inicial ou passado,  $x^{(k+1)}$  a nova estimativa,  $f'(x^{(k)})$  o valor da derivada da função no ponto  $x^{(k)}$  e  $f(x^{(k)})$  o valor que a função assume no ponto  $x^{(k)}$ .

A Eq. (7) pode ser então resolvida para um sistema com  $n$  equações através do processo iterativo para se obter as estimativas refinadas ou aproximadas da solução do problema. Por se tratar de uma metodologia iterativa, faz-se necessário a definição dos critérios de parada. O primeiro critério de parada a ser empregado é definido pelo número máximo de iterações a serem realizadas. Sabe-se que se o número máximo de iterações foi atingido quando o método não converge. O segundo critério de parada é dado através do erro relativo, dado pela Eq. (8). Quando o erro relativo calculado ( $\varepsilon_{c,i}$ ) for menor que o erro estipulado ( $\varepsilon_{e,i}$ ), significa que o método encontrou o valor desejado (CHAPRA, 2012).

$$\varepsilon_{c,i} = \left| \frac{x_k^{i+1} - x_k^i}{x_k^{i+1}} \right| \times 100 \leq \varepsilon_{e,i} \quad (8)$$

Observa-se que o teste do erro relativo supracitado tem que ser satisfeito para todas as  $n$ -ésimas variáveis desconhecidas. Atenta-se para o fato que o método de NR apresenta convergência quadrática (CHAPRA, 2012).

## 2.2 Método de Muhammad

Muhammad e Muhammad (2009) propuseram uma modificação na derivada do método de NR que o faz apresentar convergência cúbica, aqui denominado método MH1. Com a modificação a cada iteração, o método é realizado em dois passos, conforme indicados pelas Eqs. (9) e (10).

$$x = x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k) \quad (9)$$

e

$$x_{k+1} = x_k - 4 \left[ F'(x_k) + 3F' \left( \frac{x_k + 2x}{3} \right) \right]^{-1} F(x_k) \quad (10)$$

A segunda modificação proposta por Muhammad e Muhammad (2009), que será denominada nesse trabalho por método MH2, continua sendo realizada em dois passos, porém da seguinte forma:

$$y_k = x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k) \quad (11)$$

e

$$x_{k+1} = x_k - 4 \left[ 3F' \left( \frac{2x_k + y_k}{3} \right) + F'(y_k) \right]^{-1} F(x_k) \quad (12)$$

Desse modo, têm-se duas variações do método de NR de maneira que o método tenha convergência cúbica (MUHAMMAD; MUHAMMAND, 2009).

## 2.3 Método de Kumar *et al.*

O método proposto por Kumar *et al.* (2013), que nesse trabalho será denominado por KU1, faz uma modificação no método de NR para que ele apresente nona ordem de convergência. Com essa modificação o método é então realizado em três etapas a cada iteração.

$$y_n = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (13)$$

$$z_n = y_n - \left[ 1 + \left( \frac{f(y_n)}{f(x_n)} \right)^2 \right] \frac{f(y_n)}{f'(y_n)} \quad (14)$$

$$x_{n+1} = z_n - \left[ 1 + 2 \left( \frac{f(y_n)}{f(x_n)} \right)^2 - 4 \left( \frac{f(z_n)}{f(y_n)} \right) \right] \frac{f(z_n)}{f'(y_n)} \quad (15)$$

Kumar *et al.* (2013), ainda propõe outra variação para o método de NR, que nesse artigo será abordada como KU2, sendo o cálculo da derivada realizado de forma numérica. Como na forma anterior supracitada, este novo método apresenta nona ordem de convergência e possui três etapas a cada iteração. As derivadas das Eqs. (13), (14) e (15) são substituídas pelas seguintes aproximações:

$$f'(x_n) \approx f[x_n, w_n] = \frac{f(w_n) - f(x_n)}{w_n - x_n} = \frac{f(w_n) - f(x_n)}{f(x_n)} \quad (16)$$

$$f'(y_n) \approx \frac{f[y_n, x_n]f[y_n, w_n]}{f[x_n, w_n]} \quad (17)$$

Sendo,

$$w_n = x_n + f(x_n) \quad (18)$$

De posse das substituições acima, as Equações (13), (14) e (15), tornam-se:

$$y_n = x_n - \frac{f(x_n)}{f[w_n, x_n]} \quad (19)$$

$$z_n = y_n - \left[ 1 + \left( \frac{f(y_n)}{f(x_n)} \right)^2 \right] \frac{f(y_n)f[x_n, w_n]}{f[y_n, x_n]f[y_n, w_n]} \quad (20)$$

$$x_{n+1} = z_n - \left[ 1 + 2 \left( \frac{f(y_n)}{f(x_n)} \right)^2 - 4 \left( \frac{f(z_n)}{f(y_n)} \right) \right] \frac{f(z_n)f[x_n, w_n]}{f[y_n, x_n]f[y_n, w_n]} \quad (21)$$

Desse modo, têm-se mais duas variações do método de NR, uma com o uso da derivada e outra sem o uso da derivada, de forma que o método possua nona ordem de convergência (KUMAR, 2013).

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através das metodologias iterativas delineadas nas seções anteriores, quando da solução das equações transcendentais do modelo de representação de perdas e do modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura de um módulo fotovoltaico. As análises são realizadas sob a óptica de três características: levantamento da curva I×V, número de iterações e tempo de execução. A máquina no qual as rotinas foram realizadas possui as seguintes configurações: Sistema operacional *Windows 10* de 64 bits, Processador *Intel(R) Core(TM) i7* de 6ª geração, 8 GB de memória RAM, Disco rígido SSD de 240 GB e placa dedicada de vídeo *GeForce 930M*.

### 4.1 Levantamento da curva característica

Para a análise do levantamento da curva característica I×V, foi realizada a solução ponto a ponto das equações da corrente de saída de modelo respeitando o limite  $0 \leq V_M \leq V_{ca}$ , sendo  $V_{ca}$  a tensão de circuito aberto do módulo, utilizando

como critério de parada o número máximo de iterações igual a 20 e um erro de 0,01. A curva característica foi obtida para uma gama de irradiância, com valores em 1000, 800, 600, 400 W/m<sup>2</sup>, e temperaturas, com valores de 65°, 45°, 25° e 5°, a fim de se verificar tanto a dispersão no levantamento da curva como também uma possível variação ligada à modificação da irradiância e/ou da temperatura. Para a variação da irradiância, a temperatura foi mantida constante em 25 °C, já para a variação da temperatura, a irradiância foi mantida constante em 1000 W/m<sup>2</sup>. As curvas obtidas estão mostradas nas Figs. 3 e 4, para o modelo com representação de perdas e nas Figs. 5 e 6, para o modelo com representação de defeitos e impurezas na estrutura.

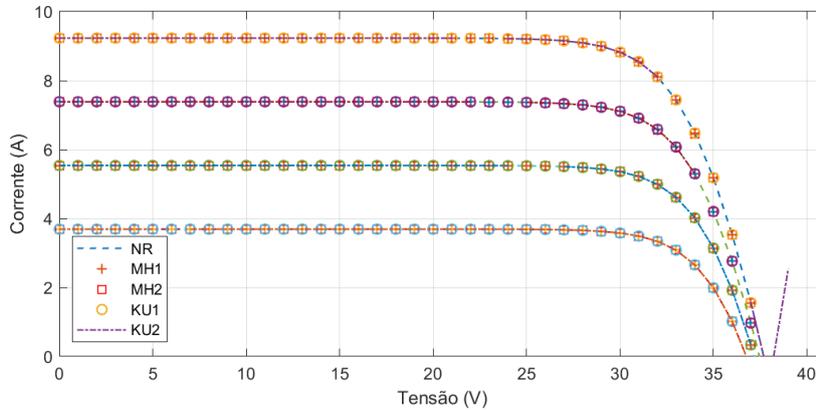


Figura 3 – Curva característica com variação de irradiância – modelo com representação de perdas.

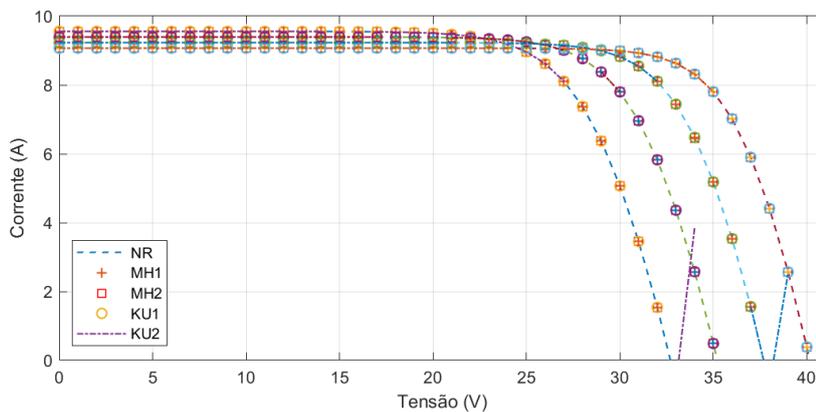


Figura 4 – Curva característica com variação de temperatura – modelo com representação de perdas.

Pela observação das curvas apresentadas nas Figs. 3 e 4, tanto para a variação da irradiância como da temperatura para o modelo com representação de perdas, pode-se inferir que os métodos de NR, MH1, MH2 e KU1 obtiveram os mesmos resultados, para um erro de 0,01. Já o método de KU2, que emprega derivada numérica, apresentou erros no decorrer do processo de solução ponto a ponto. Portanto, para o modelo com representação de perdas, no quesito de levantamento da curva características todos os métodos tiveram êxito, exceto o método de KU2.

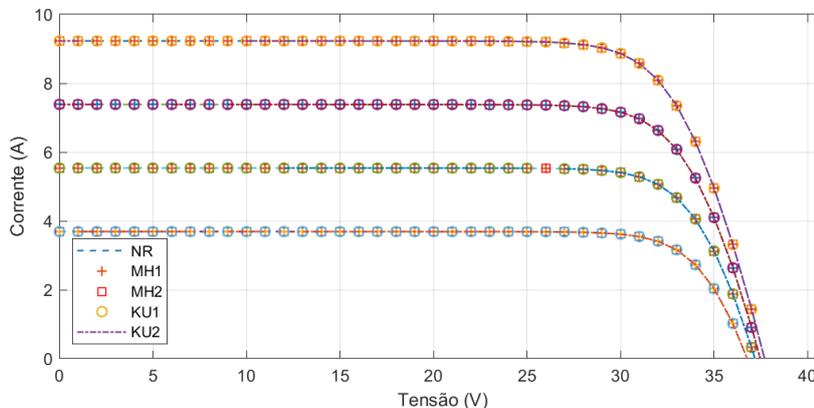


Figura 5 – Curva característica com variação de irradiância – modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura.

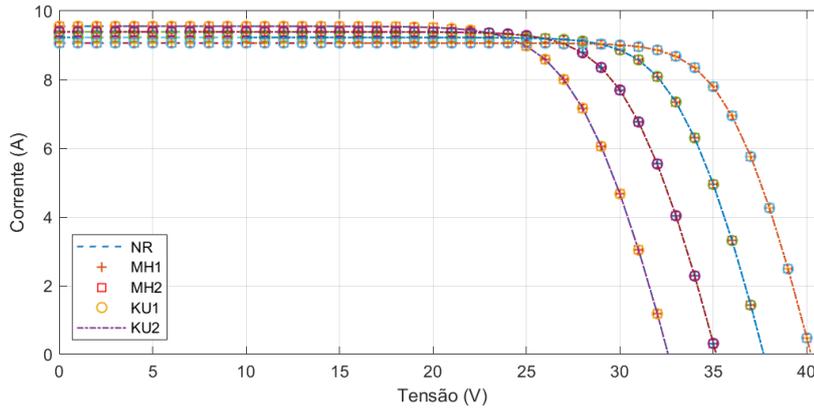


Figura 6 – Curva característica com variação de temperatura – modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura.

Pelas curvas mostradas nas Figs. 5 e 6, para a variação da irradiância e da temperatura para o modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura, pode-se perceber novamente que os métodos de NR, MH1, MH2 e KU1 obtiveram resultados muito semelhantes, para um erro de 0,01. Já o método de KU2 apresenta uma falta de dados no decorrer do processo de solução ponto a ponto, o que indica a não convergência do método para alguns pontos. Portanto, para o modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura, no quesito de levantamento da curva características  $I \times V$ , mais uma vez, todos os métodos tiveram êxito, exceto o método de KU2.

#### 4.2 Número de iterações

Em se tratando do número de iterações, foi realizado o estudo com base nas iterações para obtenção das curvas do item anterior, empregando um número máximo limite de 20 iterações. Os resultados do valor mínimo e máximo de iterações estão apresentados nas Figs. 7 e 8, para o modelo com representação de perdas e nas Figs. 9 e 10, para o modelo com representação de defeitos e impurezas na estrutura. Atenta-se para o fato de que os mnemônicos  $G_i$  e  $T_i$ , sendo  $i = 1, \dots, 4$ , referenciam os valores de irradiância e temperatura adotados no item 4.1 deste texto, respectivamente.

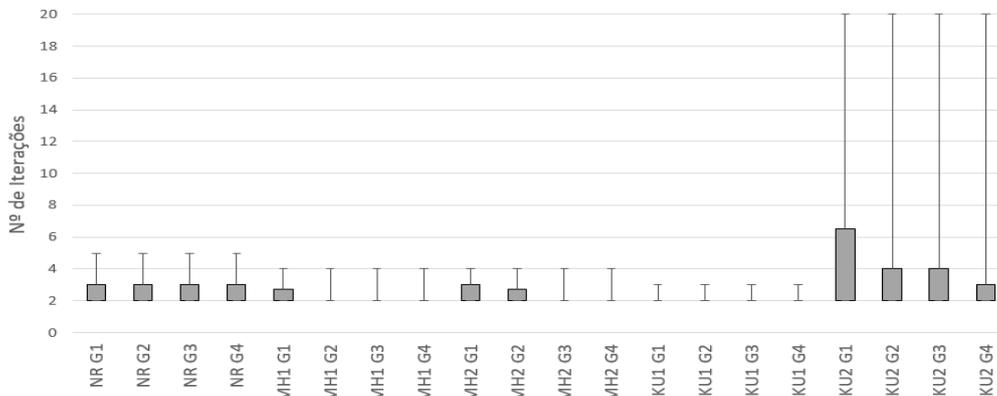


Figura 7 – Número de iterações para variação de irradiância - modelo com representação de perdas.

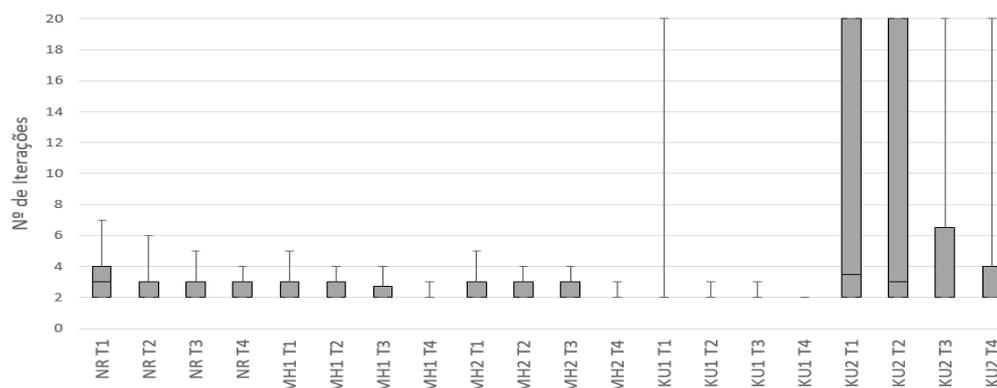


Figura 8 – Número de iterações para variação de temperatura - modelo com representação de perdas.

Nos diagramas de caixa, ficam evidentes os números máximos e mínimos das iterações necessárias por todos os métodos para obterem suas aproximações finais para cada curva, através dos terceiros quartis também é possível ver que o método de KU02 apresenta muitos pontos de não convergência. Como apresentado na Fig. 7, para variação de irradiância, os métodos que convergiram em todos os pontos não apresentaram diferença no número de iterações associado a mudança de irradiância, apenas apresentaram diferenças entre si. Em relação à variação de temperatura (Fig. 8), os métodos apresentaram variação no número de iterações em decorrência da variação de temperatura como pode ser visualizado na Fig. 8. O método KU2 não convergiu para diversos pontos da curva para ambos os casos, o que fica caracterizado pela obtenção do número máximo de iterações. Portanto, em relação ao número de iterações para o modelo com representação de perdas, para uma variação de irradiância, o método que obteve o melhor resultado foi KU1, porém os outros métodos, exceto KU2, não ficaram muito distantes. Para a variação de temperatura, os métodos que obtiveram os menores números de iterações para todas as temperaturas analisadas, foram MH1 e MH2, seguido do NR.

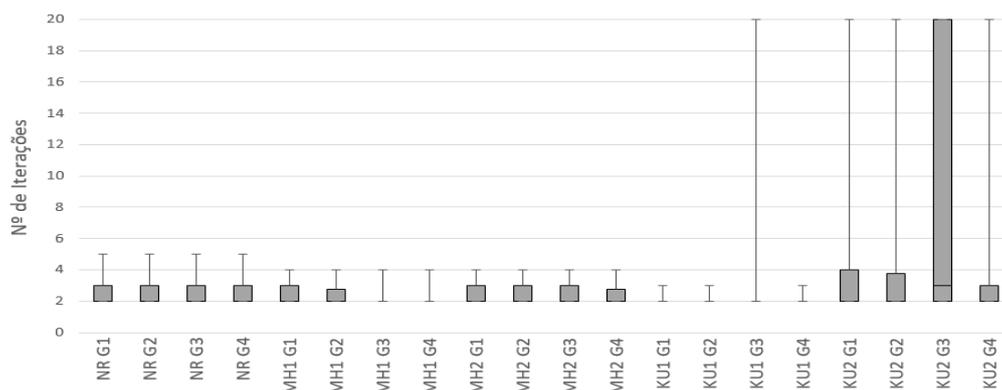


Figura 9 – Número de iterações para variação de irradiância - modelo de impurezas e defeitos na estrutura.

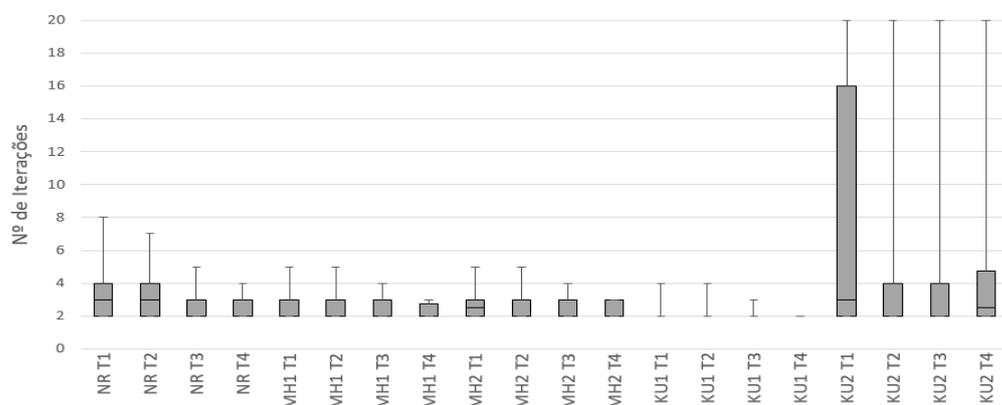


Figura 10 – Número de iterações para variação de temperatura - modelo de impurezas e defeitos na estrutura.

Como pode ser observado na Fig. 9, para variação de irradiância, os métodos que convergiram para todas as situações analisadas não apresentaram diferença no número de iterações associado à mudança de irradiância, apenas apresentaram diferenças entre si. Já para a variação de temperatura (Fig. 10), como para o caso anterior, os métodos também apresentaram variações no número de iterações, em decorrência da variação da temperatura. Note que, novamente, o método de KU2 atinge o número máximo de iterações para todas as variações de irradiância, o que indica a não convergência em alguns pontos. Portanto, para o modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura em relação a número de iterações, para uma variação de irradiância os métodos que no geral apresentaram os melhores resultados foram novamente MH1 e MH2. Para a variação de temperatura o método que obteve os menores números de iterações foi KU1.

### 4.3 Tempo de execução

Em relação ao tempo de execução, foi realizada a repetição do levantamento da curva do item 4.1 e mensurado o tempo de execução do algoritmo para um número elevado de repetições e em seguida calculada a média desses valores sendo obtidos os resultados apresentados nas Figs. 11 e 12 para o modelo com representação de perdas e nas Figs. 13 e 14 para o modelo com representação de defeitos e impurezas na estrutura.

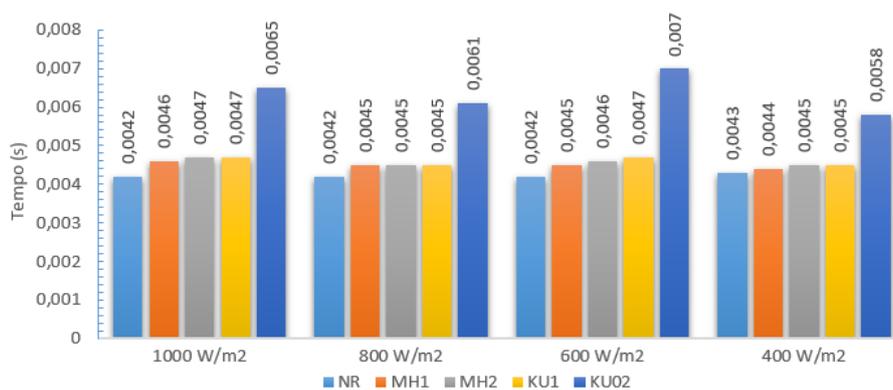


Figura 11 – Tempo de execução, para variação de irradiância - modelo com representação de perdas.

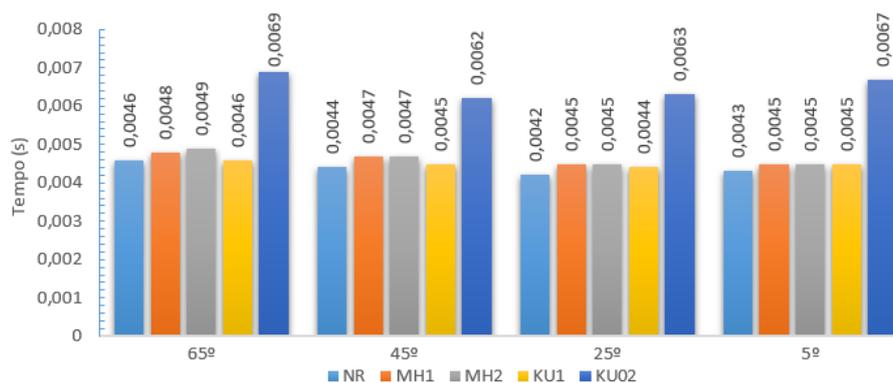


Figura 12 – Tempo de execução, para variação de temperatura - modelo com representação de perdas.

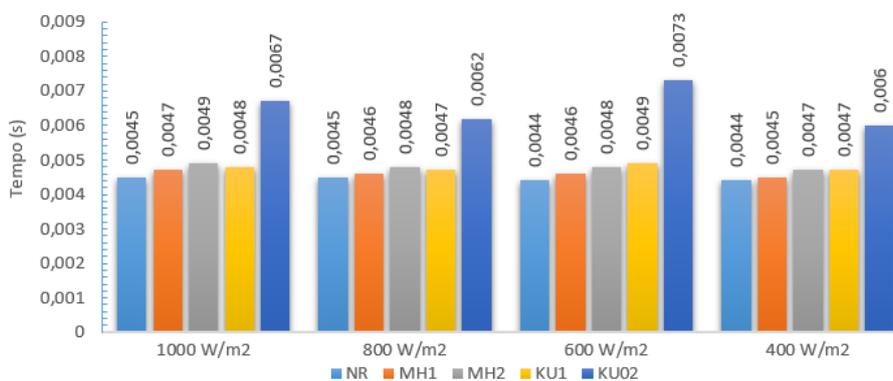


Figura 13 – Tempo de execução, para variação de irradiância - modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura.

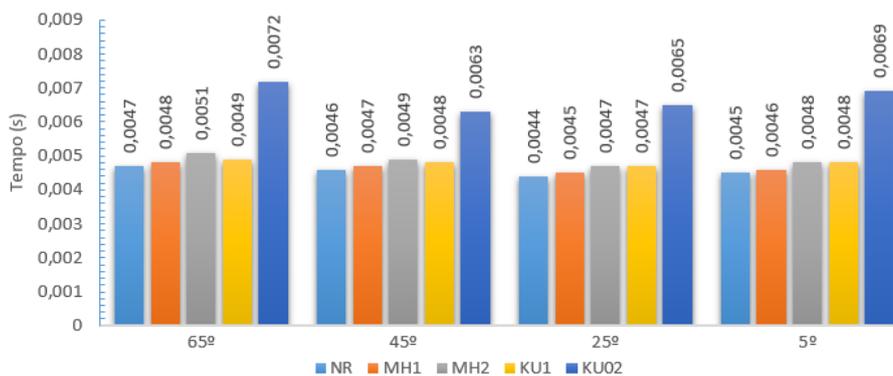


Figura 14 – Tempo de execução, para variação de temperatura - modelo com representação de impurezas e defeitos na estrutura.

Pelos dados supracitados, pode-se inferir que no quesito de tempo de execução, não importando a variação de irradiância ou temperatura, o método que apresentou solução com o menor tempo foi de NR, para ambos os modelos de representação. Mesmo esse método apresentando número de iterações um pouco maior que os outros, conforme visto no item anterior, o tempo total de execução é sempre inferior aos demais. Sendo esse o quesito de maior relevância quando se trata de metodologias computacionais, deste modo, tem-se uma vantagem para o referido método. Atente-se para o fato que o método KU2 tem o tempo de execução muito elevado, em comparação aos demais, isso se deve ao fato da sua não convergência para alguns pontos.

## 5. CONCLUSÕES

Após análise dos dados referentes aos três quesitos estudados, conclui-se que o método NR é a melhor escolha para solução do problema desse trabalho, pois apresenta um número não muito elevado de iterações, converge para todos os pontos e exige o menor esforço computacional, seguido pelos métodos MH1 e MH2. Por existir pontos onde os métodos KU1 e KU2 não convergem, esses métodos não são indicados para esse tipo de problemática.

### Agradecimentos

Agradecimentos aos professores que contribuíram para a realização desse trabalho, à Universidade Federal de Campina Grande pelas estruturas concedidas e à CAPES pela bolsa concedida ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- Alvarez, G. B., 2015. Métodos Iterativos para Problemas não Lineares, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- Chapra, S. C., 2012. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists, MC Graw Hill.
- Chaves, C. C., Oliveira, F. B. S., Araújo, C.A.O., 2019. Utilização de Métodos Numéricos para Equações Diferenciais Ordinárias de Segunda Ordem Aplicadas a Análise de Circuitos, C&D Revista Eletrônica da FAINOR, vol. 12, n. 1, pp. 18-31.
- Kumar, M., Singh, A. K., Srivastava A., 2013. Various Newton-type Iterative Methods for Solving Nonlinear Equations, Journal of the Egyptian Mathematical Society, vol. 21, n. 1, pp. 334-339.
- Muhammad, A. N., Muhammad, W., 2009. Some Iterative Methods for Solving a System of Nonlinear Equations, Computers and Mathematics with Applications, vol. 57, n. 1, pp. 101-106.
- Mamede, F. M., Silva, M. H., Silveira, R. P., 2018. Uso do Cálculo Numérico Aplicado em Softwares, Revista Campo do Saber, vol. 4, n. 3, pp. 25-30.
- Pinho, J. T., Galdinho, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CRESESB.
- Said, S. A. M., *et al*, 2018. The Effect of Environmental Factors and Dust Accumulation on Photovoltaic Modules and Dust-Accumulation Mitigation Strategies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, n. 8, pp. 743-760.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Filho, E. R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, n. 5, pp. 1198-1208.
- Walker, G., 2001. Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB PV Model, Journal of Electrical & Electronics Engineering, vol. 21, n. 1, pp.

## RESEARCH ON COMPUTER METHOD PERFORMANCE IN SOLVING NONLINEAR PHOTOVOLTAIC MODULE EQUATIONS

**Abstract.** *The study of photovoltaic modules requires the application of iterative methodologies to solve the nonlinear equation of the system. Iterative computational methods are known to require a large processing effort to perform the calculations due to the various operations performed. However, in some applications, some methods outperform others, either at the final approach or at run time. This work aimed to investigate the performance of computational methods applied in the solution of nonlinear equations to obtain the output current of a photovoltaic panel, under various irradiance and temperature conditions. We chose the Newton-Raphson method and some variations of it that aim to improve convergence. An analysis was made through the most important questions when iterative methods are concerned: the final value applied, the number of iterations recorded in the process and the execution time. One or more methods highlighted for each of the items analyzed, in addition, can be applied to a problem due to their non-convergence. From the analysis, it was verified that the Newton-Raphson method, even having quadratic convergence, is still the best option when it comes to the solution of the equations of the photovoltaic modules representative models to a diode.*

**Key words:** *Solar energy, characteristic curve, numerical methods.*